

ОПД на обрабатываемой поверхности и выявили снижение тангенциальной силы резания на 15...26% (рис. 3).

Таким образом, предложенный механизм взаимодействия остаточных напряжений после ОПД поверхности с напряжениями, возникающими в процессе резания вдоль условной плоскости сдвига при образовании стружки, следует рассматривать как приближенную схему их взаимодействия, подлежащую дальнейшему изучению с учетом специфических условий обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения. – 1972. – № 12. – С. 58–61.
2. Подураев В.Н., Шатуров Г.Ф., Войтов В.В. К вопросу обработки резанием с опережающим пластическим деформированием поверхности / Ред. журн. «Известия АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук». – Мн., 1990. – 18 с. Деп. в ВИНТИ 24.05.90. № 2849.
3. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

УДК 621.941.1

Г.Ф.ШАТУРОВ

## МЕХАНИКА ПРОЦЕССА РОТАЦИОННОГО РЕЗАНИЯ

*Институт технологии металлов НАН Беларуси  
Могилев, Беларусь*

Наличие вращательного движения режущей кромки в процессе обработки ротационным резцом ведет к изменению динамических показателей процесса, т. е. к изменению направления и величин сил резания.

Для установления всех сил, действующих на рабочих поверхностях ротационного резца, рассмотрим прямую схему резания при первой схеме установки резца (рис. 1).

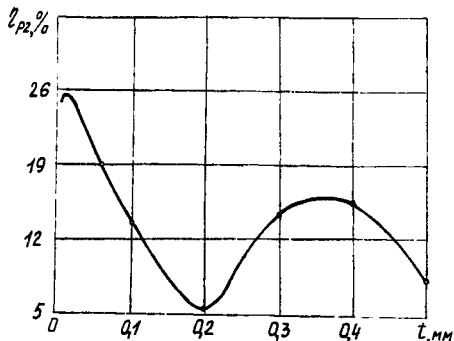


Рис. 3. Зависимость параметра  $\eta_{PZ}$  от глубины резания  $t$  при обработке заготовки вала с ОПД необработанной поверхности (материал заготовки – сталь 12Х18Н9Т;  $S = 0,43$  мм/об;  $V = 35$  м/мин;  $P = 700$  Н)

При ротационном резании в режиме установившегося процесса имеет место наличие на рабочих поверхностях реза касательных сил трения, противоположно направленных по отношению к скорости вращения, точкой раздела которых служит точка нормального скольжения – точка  $P$ , что является условием равномерности его вращения.

Поскольку передняя и задняя поверхности реза имеют контакт с заготовкой и стружкой в пределах некоторой площадки, то можно говорить о двух областях этой площадки с разнонаправленными силами трения разделенных между собой полюсной линией  $P-P$ .

Из схемы сил рис. 1 имеем:

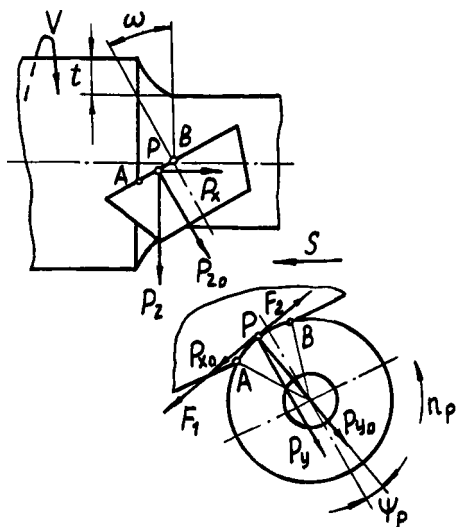


Рис. 1. Схема действия сил для самовращающегося ротационного реза (первая схема установки, прямая схема резания).

$$P_{x0} = (P_z \sin \omega - P_x \cos \omega) \cos \psi_p + P_y \sin \psi_p ;$$

$$P_{y0} = P_y \cos \psi_p - (P_z \sin \omega - P_x \cos \omega) \sin \psi_p ; \quad (1)$$

$$P_{z0} = P_x \sin \omega + P_z \cos \omega ,$$

где  $\psi_p = \frac{1}{2} \psi_K$ ;  $P_{x0}$ ,  $P_{y0}$ ,  $P_{z0}$  – соответствующие силы резания направленные соответственно касательно к режущей кромке, радиально к центру режущего элемента и вдоль оси реза;  $\psi_K$  – угол контакта режущей кромки реза с заготовкой;  $P$  – точка приложения силы резания.

Из кинестатического уравнения вращения реза имеем

$$P_{x0} = F_1 - F_2 = F_{TPO} , \quad (2)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  – силы трения на поверхности режущего элемента ротационного реза;  $F_{TPO}$  – сила трения в опорах оси реза, приведенная к режущей кромке.

Предположим, что нам известны силы  $P_{x0}$ ,  $P_{y0}$ , и  $P_{z0}$ . Тогда составляющие силы резания в системе координат детали равны:

$$P_x = P_{10} \cos \omega \sin \psi_p + P_{20} \sin \omega - (F_1 - F_2) \cos \omega \cos \psi_p;$$

$$P_y = P_{10} \cos \psi_p + (F_1 - F_2) \sin \psi_p; \quad (3)$$

$$P_z = P_{20} \cos \omega - P_{10} \sin \psi_p \sin \omega + (F_1 - F_2) \cos \psi_p \sin \omega.$$

Исходя из анализа зависимостей (3), приходим к выводу, что измерение составляющих сил резания динамометром не дает нам возможность определить силы, действующие на поверхностях режущего элемента резца. Так как при динамометрическом измерении мы находим разницу сил  $(F_1 - F_2)$ , а не сами силы  $F_1$  и  $F_2$ . Разница сил  $F_1$  и  $F_2$  это не что иное, как приведенная к режущей кромке сила трения в опорах ротационного резца  $F_{т.р.о}$ . Значение силы трения в опорах ротационного резца не должно учитываться при нахождении средних коэффициентов трения, как это делалось многими исследователями. Суммарное значение сил  $(F_1 + F_2)$  можно определить, если вращать резец принудительно со скоростью  $V_p = V \sin \lambda_A$  или  $V_p = V \sin \lambda_B$ , где  $\lambda_A$  и  $\lambda_B$  – углы наклона режущей кромки в крайних точках ее контакта с заготовкой, и измерить составляющие силы резания в этот момент. Тогда будет соблюдаться условие  $P_{x0} = F_1 + F_2$ . Однако силы  $F_1$  и  $F_2$  можно определить косвенным путем, приравняв их к силе  $P_{x0H}$  невращающегося резца и решив систему уравнений

$$\begin{cases} P_{x0H} = F_1 + F_2, \\ P_{x0} = F_1 - F_2, \end{cases} \quad (4)$$

где  $P_{x0H}$  – касательная сила, направленная вдоль режущей кромки для невращающегося режущего элемента резца.

Система уравнений (4) справедлива также при определении  $F_1$  и  $F_2$  как для передней, так и для задней рабочих поверхностей резца.

В результате экспериментальных исследований получены следующие зависимости для определения составляющих сил резания, пределы изменения факторов которых равны:  $\omega = 10 \dots 44^\circ$ ; подача  $S = (0,2 \dots 0,6)$  мм/об; глубина резания  $t = (0,2 \dots 0,6)$  мм; скорость резания  $V = (1,3 \dots 4,3)$  м/с.

При  $V_p = 0$  имеем

$$P_x = 2,2\omega - 162,5S^2 + 342,5S - 394,2t^2 + 560,6t - 210,32;$$

$$P_y = -0,248\omega^2 + 16,7\omega - 1000S^2 + 1375S + 855,6t + 12,7V - 571; \quad (5)$$

$$P_z = -0,33\omega^2 + 17\omega - 1650S^2 + 2475S - 1785,7t^2 + 2828,6t - 6,63V - 1167,7.$$

При  $V_p \neq 0$

$$P_x = -0,0785\omega^2 + 9,55\omega + 37,5S^2 + 272,5S + 112,94t^2 + 351,3t - 11,82V - 224,2;$$

$$P_y = -0,161\omega^2 + 12,31\omega - 1900S^2 + 2090S + 676,5t - 13V - 578,3; \quad (6)$$

$$P_z = -0,3\omega^2 + 15,35\omega - 1700S^2 + 2690S - 1956t^2 + 2972t - 6,63V^2 + 23,13V - 1350.$$

При использовании зависимостей (5) и (6) величины сил  $P_x, P_y, P_z$  получим в ньютонах.

Для определения нормальных и касательных сил на рабочих поверхностях режущего элемента резца была разработана методика их определения со стоп-подачей [1], по которой составляющие силы на задней поверхности определялись (рис. 2) через один оборот заготовки после выключения подачи, а затем рассчитывались по зависимостям (1; 4) и формулам:

для передней поверхности:

$$N_{\pi} = P_{z0\pi} \cos \gamma_3' - P_{y0\pi} \sin \gamma_3';$$

$$F_{\pi\pi} = P_{z0\pi} \sin \gamma_3' + P_{y0\pi} \cos \gamma_3';$$

$$F_{\pi\pi} = P_{x0\pi}; \quad (7)$$

$$F_{\pi} = \sqrt{F_{\pi\pi}^2 + F_{\pi\pi}^2};$$

$$f_{\pi} = F_{\pi} / N_{\pi};$$

для задней поверхности:

$$N_3 = P_{z03} \cos \alpha_3 - P_{y03} \sin \alpha_3;$$

$$F_{N3} = P_{z03} \sin \alpha_3 + P_{y03} \cos \alpha_3;$$

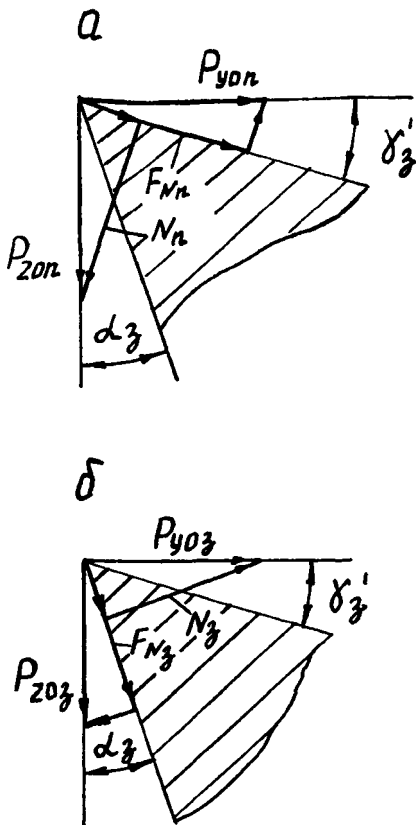


Рис. 2. Схема действия сил на передней (а) и задней (б) поверхностях самовращающегося ротационного резца

$$F_{\tau 3} = P_{\text{х}03}; \quad (8)$$

$$F_3 = \sqrt{F_{N3}^2 + F_{\tau 3}^2};$$

$$f_3 = F_3 / N_3.$$

На основании результатов исследований установлено, что коэффициент трения на передней поверхности для резца с самовращающимся режущим элементом на 5...15% меньше, чем для невращающегося. Коэффициент трения на задней поверхности для резца с невращающимся режущим элементом при  $\omega > 28^\circ$  меньше, чем для самовращающегося (рис. 3).

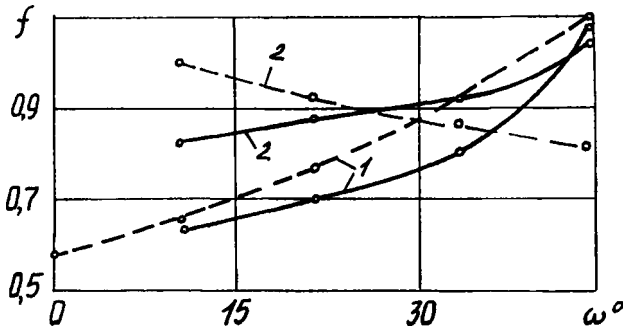


Рис. 3. Зависимости влияния угла установки самовращающегося ротационного резца на средний коэффициент трения на передней (1) и задней (2) его поверхностях (материал заготовки — сталь 45;  $S = 0,4$  мм/об;  $t = 0,4$  мм;  $V = 3,1$  м/с; — о — — ротационный; - - о - - невращающийся режущие элементы резца).

Таким образом, оптимизацию процесса резания для ротационного резца нужно производить с учетом суммы сил  $F_1$  и  $F_2$ , которая превосходит измеряемую динамометром силу  $P_{\text{х}0}$ , равную приведенной к режущей кромке силе трения в опорах резца  $F_{\text{т}PO}$  в 2...3 раза (табл. 1).

Отсутствие в реальном процессе силы  $F_2$  приводит к вибрациям, нестабильности процесса резания из-за нарушения кинестатического равновесия вращения режущего элемента резца. Это может иметь место, когда сила трения в опорах резца превосходит касательную силу  $F_1$  и полюс  $P$  находится вне зоны  $AB$  контакта режущей кромки с заготовкой (см. рис. 1). Измерение при динамометрировании силы  $P_{\text{х}0} = F_{\text{т}PO}$ , а не суммы  $F_1$  и  $F_2$  и объясняет большие расхождения в величинах сил  $P_x$ ,  $P_y$  и  $P_z$  при ротационном резании, опубликованные в различных источниках многими исследователями.

Таблица 1

Значения касательных к режущей кромке сил трения, действующих на передней рабочей поверхности самовращающегося ротационного резца ( $S = 0,4$  мм/об;  $t = 0,4$  мм;  $V = 3,1$  м/с; материал заготовки – сталь 45)

$\omega^\circ$	11	22	33	44
$F_1, \text{H}$	17,8	64,2	120,8	122,7
$F_2, \text{H}$	9,5	31,3	26,5	35,6
$F_n, \text{H}$	27,3	95,5	147,3	158,3
$P_{\text{ХО}}, \text{H}$	8,3	32,9	94,3	87,2

Следовательно, как для передней, так и для задней поверхностей резца с точки зрения уменьшения касательных сил трения необходимо стремиться к минимальным углам установки  $\omega$  ( $\omega_{\text{opt}} \leq 28^\circ$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1207632 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ определения сил на задней поверхности резца и упругой деформации материала при его обработке / Г.Ф Шатуров, В.Н. Подураев (СССР).– № 37786655-08; Заявлено 09.08.84; Опубл. 30.01.86; Бюл. № 4.